

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Н. А. Панченко, А. А. Халатов

СПЕЦГЛАВИ ТЕОРІЇ ТЕПЛООБМІНУ

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДО КУРСУ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Рецензент *Тимченко, М.П.*, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник,
Інститут технічної теплофізики НАНУ
Коваленко, А.С., канд. техн. наук, доц., ст. наук. співробітник,
Інститут технічної теплофізики НАНУ

Відповідальний редактор *Литвинова, Т.В.*, канд. фіз.-мат. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 4 від 10.12.2020 р.)
за поданням Вченої ради Фізико-технічного інституту (протокол № 9 від 26.10.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Панченко Надія Анатоліївна, канд. техн. наук
Халатов Артем Артемович, акад., д-р техн. наук, проф.

СПЕЦГЛАВИ ТЕОРІЇ ТЕПЛООБМІНУ НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДО КУРСУ

Спецглави теорії теплообміну: Навчально-методичний комплекс до курсу [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / Н. А. Панченко, А. А. Халатов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 248 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 17 с.

Навчально-методичний комплекс до курсу «Спецглави теорії теплообміну» призначено для студентів, які навчаються за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Навчальний посібник містить в собі програму дисципліни, навчально-тематичний план, перелік питань для модульного контролю знань, перелік рекомендованої літератури. Під час навчання студенти розширюють знання з теплообміну в складних термогазодинамічних процесах. Значна увага приділена умінню самостійно формулювати, аналізувати тенденції розвитку науки про теплові процеси і вирішувати задачі теплообміну в елементах енергетичного устаткування, отримати навички розрахунку теплових процесів в сучасних та перспективних енергетичних установках.

© Н. А. Панченко, А. А. Халатов, 2020
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

Зміст.....	3
Вступ.....	4
Структура та зміст занять.....	5
Розділ 1. Тепловіддача в хімічно реагуючих потоках.....	6
Розділ 2. Тепловіддача в криволінійних течіях.....	6
Розділ 3. Теплообмін в закручених потоках.....	7
Розділ 4. Теплообмін в каналах, що обертаються	8
Розділ 5. Теплообмін в системах з заглибленнями на поверхні.....	8
Розділ 6. Теплообмін в каналах енергетичних установок.....	9
Практичні (семінарські) заняття.....	11
Завдання на СРС.....	12
Модульна контрольна робота.....	14
Рекомендована література.....	16

ВСТУП

Метою вивчення дисципліни «Спецглави теорії теплообміну» є отримання магістрами професійних знання в області методів розрахунку теплообміну в складних теплофізичних процесах. Отримані знання дають можливість виконувати дослідження фізичних процесів в енергетичних установках і розрахунки теплообміну та течій в елементах енергетичних систем.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

знання: закономірностей теплообміну в складних термогазодинамічних процесах.

вміння: самостійно формулювати, аналізувати і вирішувати задачі теплообміну в елементах енергетичного устаткування.

досвід: розрахунку теплових процесів в сучасних та перспективних енергетичних установках.

СТРУКТУРА ТА ЗМІСТ ЗАНЯТЬ

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	Всього	у тому числі			
		Лекцій	Практичних (семінарських) занять	Лабораторні роботи (комп'ютерний практикум)	СРС
1	2	3	4	5	6
Розділ 1. Тепловіддача в хімічно реагуючих потоках.					
Тема 1.1. Вступ. Тепловіддача в хімічно реагуючих потоках.	4	2	1		1
Тема 1.2. Розрахунок тепловіддачі в хімічно реагуючій течії.	4	2	1		1
Разом по розділу 1	8	4	2		2
Розділ 2. Тепловіддача в криволінійних течіях.					
Тема 2.1. Особливості криволінійних течій.	4	2	1		1
Тема 2.2. Теплообмін на криволінійній стінці. Вихори Гертлера.	4	2	1		1
Тема 2.3. Особливості гідродинаміки та теплообміну в криволінійних каналах.	4	2	1		1
Разом по розділу 2	12	6	3		3
МКР 1	6		1		5
Розділ 3. Теплообмін в закручених потоках.					
Тема 3.1. Характеристика закрученого потоку.	4	2	1		1
Тема 3.2. Теплообмін та гідродинаміка закручених потоків.	4	2	1		1
Тема 3.3. Циклонне охолодження лопаток ГТД.	4	2	1		1
Разом по розділу 3	12	6	3		3
Розділ 4. Теплообмін в каналах, що обертаються.					
Тема 4.1. Структура течії в каналах, що обертаються навколо своєї осі.	4	2	1		1
Тема 4.2. Теплообмін та гідравлічний опір в трубі, що обертається радіально.	4	2	1		1
Тема 4.3. Теплообмін в зазорі між коаксіальними циліндрами, що обертаються.	4	2			2
Разом по розділу 4	12	6	2		4
Розділ 5. Теплообмін в системах з заглибленнями на поверхні.					
Тема 5.1. Одиночне сферичне заглиблення.	5	2	1		2
Тема 5.2. Одно- та дворядна система сферичних заглиблень.	5	2	1		2
Тема 5.3. Канали з багаторядними поверхневими заглибленнями.	5	2	1		2
Разом по розділу 5	15	6	3		6
МКР 2	6		1		5
Розділ 6. Теплообмін в каналах енергетичних установок.					
Тема 6.1. Кипіння рідини в трубах.	5	2	1		2
Тема 6.2. Тепловіддача у відривних зонах.	5	2	1		2
Тема 6.3. Мікрооребрення в каналах ГТД. Двофазна течія (газ-тверді частинки) в соплах Лавалю.	5	2	1		2
Тема 6.4. Теплові труби та їх використання в системах охолодження.	4	2			2
Разом по розділу 6	19	8	3		8
Екзамен	30				30
Всього годин	120	36	18		66

РОЗДІЛ 1. ТЕПЛОВІДДАЧА В ХІМІЧНО РЕАГУЮЧИХ ПОТОКАХ

Тема 1.1. Вступ. Тепловіддача в хімічно реагуючих потоках

Вступ.

Особливості тепловіддачі в хімічно реагуючому газі.

Рівняння для розрахунку теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на непроникній стінці.

Хімічно рівноважний примежовий шар, хімічно нерівноважна течія на каталітичній стінці.

Система диференціальних рівнянь та додаткова умова фізичної подоби.

Література: [1, с.318-361], [2, с. 448-450]

Тема 1.2. Розрахунок тепловіддачі в хімічно реагуючій течії

Розрахунок тепловіддачі в хімічно реагуючій течії.

Ефективні характеристики переносу.

Розрахунок тепловіддачі на каталітичній стінці.

Література: [1, с.361-363], [2, с. 451-457]

РОЗДІЛ 2. ТЕПЛОВІДДАЧА В КРИВОЛІНІЙНИХ ТЕЧІЯХ

Тема 2.1. Особливості криволінійних течій

Характеристика криволінійних течій. Фізична подоба.

Перехід до турбулентної течії. Особливості математичного опису. Профілі швидкості та турбулентна структура в примежовому шарі.

Література: [3, с. 8-57], [4, с. 192-197]

Тема 2.2. Теплообмін на криволінійній стінці. Вихори Гертлера

Теплообмін та поверхневе тертя на ввігнутій та опуклій стінці.

Відцентрова нестійкість Гертлера. Вихори Гертлера.

Адаптація та релаксація примежового шару.

Література: [3, с. 57-61], [4, с. 197-213], [5, с. 129-270]

Тема 2.3. Особливості гідродинаміки та теплообміну в криволінійних каналах

Напівобмежена струя на ввігнутій та опуклій поверхні.

Плівкове та пористе охолодження на криволінійній поверхні.

Особливості гідродинаміки та теплообміну в криволінійних каналах.

Література: [3, с. 101-103], [4, с. 205-211], [5, с. 159-237], [6, с. 33-67]

РОЗДІЛ 3. ТЕПЛООБМІН В ЗАКРУЧЕНИХ ПОТОКАХ

Тема 3.1. Характеристика закрученого потоку

Характеристика закрученого потоку. Фактори інтенсифікації теплообміну.

Способи закрутки течії.

Фізична подoba течій з початковою закруткою.

Гідродинаміка закрученої течії в трубах. Вплив граничних умов.

Теплообмін закрученої течії в трубах. Вплив граничних умов.

Література: [6, с. 6-73], [7, с. 118-142], [8, с. 6-50]

Тема 3.2. Теплообмін та гідродинаміка закручених потоків

Теплообмін та гідродинаміка біля завихрювачів. Стабільність течії.

Теплообмін та гідравлічний опір всередині скручених труб та змійовиків.

Теплообмін та гідравлічний опір в пучках скручених труб.

Література: [6, с. 32-38], [7, с. 63-66], [8, с. 117-121], [9, с. 149-170]

Тема 3.3. Циклонне охолодження лопаток ГТД

Теплообмін в надзвукових соплах Лаваля.

Циклонне охолодження лопаток ГТД.

Вихрова матриця в системі охолодження лопаток ГТД.

Література: [8, с.129-132], [10, с. 67-83], [11, с. 53-167], [4, с. 137-172]

РОЗДІЛ 4. ТЕПЛООБМІН В КАНАЛАХ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ

Тема 4.1. Структура течії в каналах, що обертаються навколо своєї осі

Структура течії, стабільність та фізична подoba в каналах, що обертаються навколо своєї осі. Режими течії.

Теплообмін та гідравлічний опір в трубах, що обертаються навколо своєї осі.

Особливості структури течії в трубi, що обертається радіально. Режими течії. Фізична подoba.

Література: [7, с. 168-180]

Тема 4.2. Теплообмін та гідравлічний опір в трубi, що обертається радіально

Теплообмін та гідравлічний опір в трубi, що обертається радіально.

Структура течії в зазорі між коаксіальними циліндрами, що обертаються.

Фізична подoba та стабільність в зазорі між циліндрами, що обертаються.

Література: [7, с. 180-197]

Тема 4.3. Теплообмін в зазорі між коаксіальними циліндрами, що обертаються

Теплообмін в зазорі між коаксіальними циліндрами, що обертаються.

Література: [7, с. 197-210]

РОЗДІЛ 5. ТЕПЛООБМІН В СИСТЕМАХ З ЗАГЛИБЛЕННЯМИ НА ПОВЕРХНІ

Тема 5.1. Одиночне сферичне заглиблення

Класифікація поверхневих заглиблень.

Одиночне сферичне заглиблення. Структура течії. Режими течії в заглибленні. Перехід до турбулентності за заглибленням.

Теплообмін та гідравлічний опір за одиночним сферичним та циліндричним заглибленням.

Література: [12, с. 216-268]

Тема 5.2. Одно- та дворядна система сферичних заглиблень

Одно- та дворядна система сферичних заглиблень: особливості структури течії та перехід до турбулентності за заглибленням.

Одно- та дворядна система сферичних заглиблень: теплообмін та гідравлічний опір, вплив форми заглиблення.

Література: [12, с. 257-309], [11, с. 237-246]

Тема 5.3. Канали з багаторядними поверхневими заглибленнями

Теплообмін та гідравлічний опір в каналах з багаторядними поверхневими заглибленнями.

Теплообмін поперечному обтіканні труб з поверхневими заглибленнями.

Пучки труб.

Вихрові технології аеротермодинаміки: плівкове охолодження, керування відривом потоку, внутрішнє охолодження лопаток ГТД.

Література: [12, с. 377-380], [11, с. 100-130]

РОЗДІЛ 6. ТЕПЛООБМІН В КАНАЛАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Тема 6.1. Кипіння рідини в трубах

Кипіння рідини в трубах.

Криза кипіння в трубах та керування кризою.

Підведення газу та рідини в примежовий шар.

Ламінарно-турбулентний перехід.

Тепловіддача на шорсткій поверхні.

Література: [1, с. 332-403], [13, с. 148-203]

Тема 6.2. Тепловіддача у відривних зонах

Тепловіддача у відривних зонах.

Плівкове охолодження на пласкій поверхні.

Пористі вставки в каналах.

Література: [14, с. 8-33], [15, с. 90-110]

Тема 6.3. Мікрооребрення в каналах ГТД. Двофазна течія (газ-тверді частинки) в соплах Лаваля

Мікрооребрення в каналах ГТД.

Двофазна течія (газ-тверді частинки) в соплах Лаваля.

Література: [1, с. 378-382], [13, с. 87-103]

Тема 6.4. Теплові труби та їх використання в системах охолодження

Теплові труби та їх використання в системах охолодження.

Література: [1, с.437-442]

ПРАКТИЧНІ (СЕМІНАРСЬКІ) ЗАНЯТТЯ

Під час практичних занять розглядаються наступні теми:

1. Тепловіддача в хімічно реагуючих потоках.

Література: [1, с.318-363], [2, с. 448-457]

2. Тепловіддача в криволінійних течіях.

Література: [3, с. 8-61], [4, с. 192-213], [5, с. 129-270], [6, с. 33-67]

3. Теплообмін в закручених потоках.

Література: [6, с. 32-38], [7, с. 63-66], [8, с. 117-121], [9, с. 149-170]

4. Циклонне охолодження лопаток ГТД.

Література: [8, с.129-132], [10, с. 67-83], [11, с. 53-167], [4, с. 137-172]

5. Теплообмін в каналах, що обертаються.

Література: [7, с. 168-210]

6. Теплообмін в системах з заглибленнями на поверхні.

Література: [12, с. 216-309], [11, с. 237-246]

7. Багаторядні поверхневі заглибленнями.

Література: [12, с. 377-380], [11, с. 100-130]

8. Теплообмін в каналах енергетичних установок

Література: [1, с. 332-403, 437-442], [13, с. 87-103, 148-203], [14, с. 8-33], [15, с. 90-110]

ЗАВДАННЯ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Для більш глибокого засвоєння знань студентам пропонуються наступні теми для самостійного опанування:

1. Рівноважні та нерівноважні процеси. Особливості тепловіддачі при хімічних реакціях.
2. Теплофізичні властивості при дисоціації. Ефективне число Прандтля, число Л'юїса.
3. Розподіл дотичних напружень тертя та «від'ємна» густина потоку.
4. Застосування законів тертя та теплообміну для розрахунку тепловіддачі на випуклій та вигнутій поверхні.
5. Стабільність напівобмеженої струї біля випуклої та ввігнутої стінки. Формування вихорів Гертлера та Тейлора в криволінійних каналах.
6. Локальне та інтегральне числа подібності в закрученому потоці. Зв'язок між ними. Затухання закрутки в трубі.
7. Заглушення турбулентності біля завихрювача. Фізична структура потоку в пучках скручених труб.
8. Структура «звукової» лінії в соплах з закруткою потоку. Можливість регулювання тяги сопла за рахунок закрутки.
9. Стабільність потоку в трубі, що обертається навколо своєї осі. Коріолісові сили та їх вплив на теплообмін.
10. Стабільність потоку, вплив осьової течії на вихрову структуру потоку в зазорі між циліндрами, що обертаються. Карта режимів.
11. Режими течії та рівняння для розрахунку теплообміну в зазорі між циліндрами, що обертаються.
12. Карта режимів в одиночному заглибленні, форма вихорів. Перехід до турбулентності.

13. Особливості структури потоку та теплообміну в одно- та дворядних системах.

14. Особливості течії та теплообміну при обтіканні одиночної труби з заглибленнями. Плівкове охолодження пластини за системою дворядних напівсферичних заглиблень.

15. Фізична структура потоку при підведенні газу в примежовий шар. Критична умова вдуву.

16. Причини інтенсифікації теплообміну в відривних зонах. Способи плівкового охолодження.

17. Інерційне осадження частинок. Особливості теплообміну в соплах Лавалю з двофазним потоком.

18. Принцип роботи теплової труби. Умови її ефективної роботи.

МОДУЛЬНА КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Навчальною програмою дисципліни "Спецглави теорії теплообміну" передбачено написання модульної контрольної роботи, яка складається з двох частин (МКР1 та МКР2), та проводиться на 8-ому та 16-ому тижнях. Результати контрольних робіт оголошуються кожному студенту окремо у присутності або в дистанційній формі, та вносяться в відомість Поточний контроль в "Електронному Кампусі КПП".

Орієнтовний список питань до МКР1 (Розділ 1-2):

1. Закон масообміну.
2. Особливості тепловіддачі в хімічно реагуючому потоці.
3. Формула теплового потоку в хімічно реагуючому потоці.
4. Системи диференціальних рівнянь тепловіддачі в хімічно реагуючих потоках.
5. Додаткова умова подібності потоків при наявності хімічних реакцій.
6. Особливості гідродинаміки і теплообміну близько випуклої і увігнутої стінки.
7. Стійкість криволінійного потоку.
8. Фізична подібність криволінійного потоку
9. Профілі швидкості і температури
10. Відцентрова нестійкість Гертлера на увігнутій поверхні.

Орієнтовний список питань до МКР2 (Розділ 3-4):

1. Особливості гідродинаміки і теплообміну закрученого потоку.
2. Подібність закручених потоків.
3. Параметри закрутки завихрювача.
4. Гідродинаміка і теплообмін поблизу завихрювача.
5. Гідродинаміка закрученого потоку в трубі.

6. Теплообмін в трубі з початкової закруткою.
7. Фактори інтенсифікації теплообміну.
8. Тепловіддача в трубі, що обертається навколо своєї осі.
9. Структура потоку і подібність в трубі, що обертається радіально.
10. Режими течії і тепловіддача в трубі, що обертається радіально.

Результат модульної контрольної роботи для студента, який не з'явився на контрольний захід без поважної причини, є нульовим. У такому разі, студент має можливість написати модульну контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50% від загальної кількості балів. Повторне написання модульної контрольної роботи не допускається.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Мукачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1991 – 470 с.
2. Авдуевский В.С. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1975 – 623 с.
3. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика около криволинейных поверхностей. К.: Наукова Думка, 1992, 135 с.
4. Ануров Ю.М., Коваль В.А., Халатов А.А. и др. Обеспечение показателей надежности и ресурса ГТД стационарного применения ч.2. Харьков, Изд. Монограф, 2011, 318 с.
5. Халатов А.А. и др. Термогазодинамика сложных потоков около криволинейных поверхностей. К.: Изд ИТТФ НАНУ, 1999, 300 с.
6. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982, 240 с.
7. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика вихревых потоков в полях массовых сил. М.:Машиностроение, 1980, 240 с.
8. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. К.: Наукова Думка, 1989, 200 с.
9. Данилов Ю.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А., Ашмантас Л.А. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы. М.: Машиностроение, 1986, 199 с.
10. Халатов А.А. и др. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 9: Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин. К.: Изд. ИТТФ НАНУ, 2010, 317 с.
11. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 7: Вихревые технологии аэротермодинамики в энергетическом газотурбостроении. К.: Изд. ИТТФ НАНУ, 2008, 292 с.
12. Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 5: Тепломассообмен

гидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. К.: Изд. ИТТФ НАНУ, 2005, 500 с.

13. Доник Т.В., Письменный Д.Н. Теплообмен и гидродинамика закрученных и вихревых потоков в каналах. К.: Наукова Думка, 2014, 188 с.
14. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. М.: Наука, 1983, 239 с.
15. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Казань: Центр индустриальных технологий, 2007, 239 с.
16. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепло- массообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972, 341 с.
17. Rao Yu, Biegger C., Weigand B. Flow and heat transfer measurements in swirl tubes with one and multiple tangential inlet jets for internal gas turbine blade. *Internal Journal Heat and Mass Transfer*, 73, 2018, p.174-187
18. Hamza Fawzy, Qun Zheng, and Naseem Ahmad. Effect of slot area ratio and slot angle on swirl cooling in a gas turbine blade leading edge. *Journ. Aerospace Eng.*, 2020, 33(5): 04020046 (1-13).
19. Gang Lin, Karsten Kusterer, et al. Investigation on heat transfer enhancement and pressure loss of double swirl chambers cooling. *Propulsion and Power Research*, 2013, 2(3), p.177-187.